Краткие сообщения

01

Идентификация объектов на основе анализа функции числа состояний акустического отклика

© А.Л. Тукмаков, И.Б. Аксенов

Институт механики и машиностроения
Казанский научный центр РАН,
420111 Казань, Россия
e-mail: tukmakov@mail.knc.ru

(Поступило в Редакцию 10 ноября 2002 г. В окончательной редакции 10 января 2003 г.)

Предлагается метод анализа акустического отклика, позволяющий идентифицировать источник эхосигнала. Метод основан на построении образа эхосигнала в фазовом пространстве и на сопоставлении динамическому процессу дискретного множества состояний. Критерий идентичности вырабатывается при сравнении дискретных состояний эхосигнала от некоторого объекта и состояний, характерных для эхосигнала известного объекта.

При анализе состава акустического эхосигнала традиционно применяются методы фурье- или вейвлет-разложения. В этом случае критерий идентичности объектов — источников отклика может быть сформулирован сопоставлением коэффициентов разложения эхосигнала при заданных параметрах внешнего возбуждения. В данной работе предлагаются метод и критерий идентификации объектов по эхосигналу, основанные на анализе дискретного множества состояний динамической системы [1,2].

Рассмотрим применение метода для выработки критерия идентичности или различия объектов — источников акустического эхосигнала. Пусть необходимо найти качественное различие между двумя лопатками промежуточной ступени компрессора высокого давления (рис. 1, a). Детали относятся к одному типоразмеру, но имеют геометрические отличия. Акустичекий сигнал формируется при соударении лопатки с ударником. Ударник представляет собой наклонный лоток, по которому вкатывается стальной шарик (рис. 1, b). Лопатка закрепляется в подвеске, обеспечивающей повторяемость расположения ее поверхости относительно ударника, и обладает малым демпфированием.

В результате соударения шарика с неподвижной лопаткой возникают акустические колебания, которые принимаются емкостным микрофоном, подключенным к звуковой плате компьютера. Спектры мощности акустических сигналов от первой и второй лопаток имели одинаковую структуру, но были взаимно смещены вдоль оси частот (рис. 2).

Функция числа состояний динамической системы

Для исследования акустического сигнала, содержащего информацию об объекте, применена функция числа состояний динамической системы [1,2]. Рассмотрим образ динамического процесса $u(t)$ в фазовом пространстве, ограничившись для простоты изложения двумя измерениями. Вдоль продольной оси будем откладывать значения функции $u(t_i)$ в дискретные мометы времени t_i,

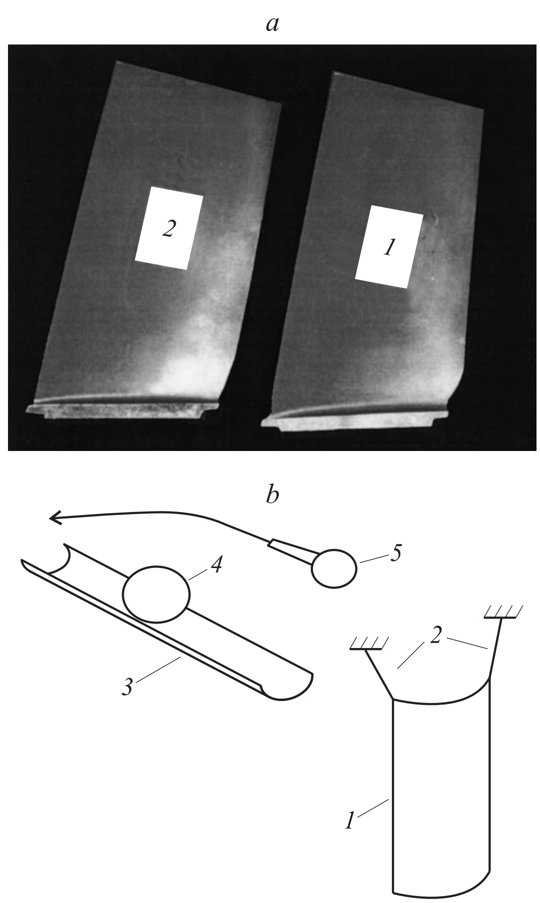

Рис. 1. a — лопатки компрессора; b — схема эксперимента: 1 — лопатка; 2 — подвес; 3 — наклонный лоток; 4 — стальной шарик; 5 — микрофон.

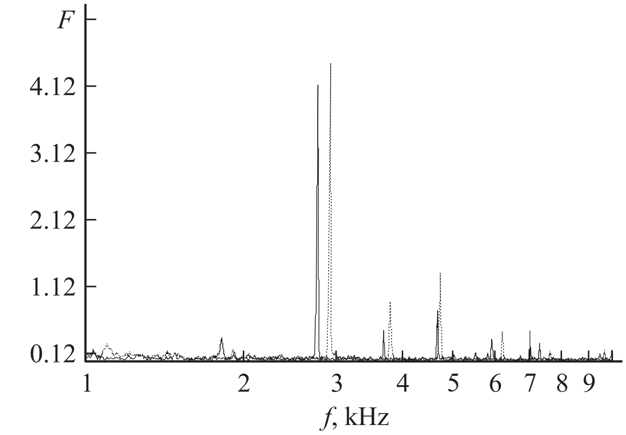

Рис. 2. Спектры мощности колебаний лопаток 1 и 2. Спектральные линии лопатки 2 (сплошная линия) смещены влево относительно спектральных линий лопатки 1 (штриховая линия).

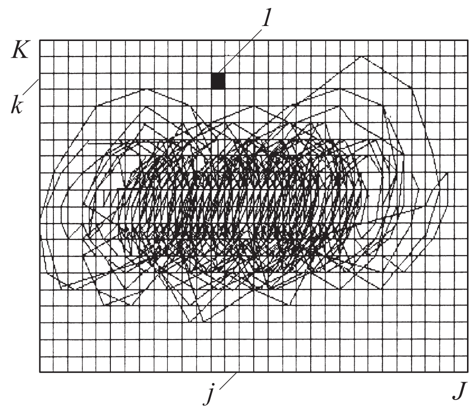

Рис. 3. Пространство состояний динамического процесса. *1* — состояние $(k-1)J+j$.

вдоль поперечной оси — разность $u(t_i) - u(t_{i-1})$ [1,2]. В общем случае размерность фазового пространства вложения определяется хаусдорфовой размерностью аттрактора.

Введем множество состояний рассматриваемого динамического процесса, покрыв проекцию аттактора на фазовую плоскость сеткой с заданными размерами ячейки ΔX, ΔY [1,2], имеющую J и K ячеек в X- и Y-направлениях (рис. 3). Попадание точки аттрактора в ячейку (j, k) будем отождествлять с состоянием системы, имеющим номер $(k-1)J+j$. Таким образом, состояние динамической системы характеризуется некоторым диапазоном значений функции ΔX и с точностью до постоянного множителя диапазоном скорости ее изменения ΔY. Под состоянием системы в многомерном фазовом пространстве понимается принадлежность точки аттрактора к определенной ячейке гиперкуба. Для того чтобы дальнейший анализ был информативным, размеры ячеек должны находиться вне областей насыщения и бедной статистики [3].

Построим функцию числа состояний динамической системы следующим образом: в текущий момент времени функция увеличивается на единицу, если анализируемое состояние не содержится в некотором базовом множестве. В зависимости от глубины анализа под состоянием понимается состояние $N(t_i)$ в текущий момент времени t_i либо совокупность состояний $(N(t_i), N(t_{i-1}), N(t_{i-2}), \ldots, N(t_{i-n}))$, учитывающая ряд предшествующих моментов времени. Определенная таким способом функция числа состояний реагирует на изменение амплитуды и частоты анализиуемой временно́й реализации относительно значений, содержащихся в базовом множестве. Чувствительность функции числа состояний можно варьировать в широких пределах как за счет выбора размерности анализируемой фазовой кривой (фазовая кривая в пространстве вложения или ее проекции) и выбором размеров ячеек сетки, покрывающей область, занятую фазовой кривой, так и определением глубины анализа состояния во времени.

Формирование базового множества

Базовое множество, по отношению к которому определяется новизна текущего состояния, формируется в процессе анализа временно́й реализации сигнала и является полным, если все (или почти все) возможные его состояния исчерпываются в течение конечного интервала времени. При исследовании акустической реакции на внешнее возбуждение базовое множество будем формировать из состояний, реализующихся в серии соударений лопатки с ударником. Рассмотрим, как зависит скорость роста числа его новых состояний от числа соударений. Пусть функция числа состояний N в момент времени t_i увеличивается на единицу, если это состояние в предыдущие моменты времени не встречалось. В противнм случае функция N не меняется. Одновременно с функцией строится базовое множество, куда добавляется текущее состояние, если оно привело к росту N.

Анализ результатов

На рис. 4, *a* показаны функция числа состояний и сигнал с выхода микрофона в серии ударов по лопатке 1, по которой произведены первые одиннадцать импульсов серии. С каждым ударом уменьшается скорость нарастания числа новых состояний N — новые состояния добавляются в базовое множество, происходит обучение системы. Зависимость между числом новых состояний и порядковым номером импульса в серии была получена методом наименьших квадратов для степенной функции. Оказалось, что скорость обучения системы описывается законом Ципфа [4] $\Delta N \approx A/n^{(1+\alpha)}$, $A = 573$, $\alpha = 0.38$, где n — порядковый номер импульса в серии (рис. 4, *b*). При этом „алфавит“ Ципфа образуется множеством состояний системы в дискретном фазовом пространстве. Каждое из состояний обладает некоторой собственной частотой повторения, определяющей ранг состояния в базовом множестве [4].

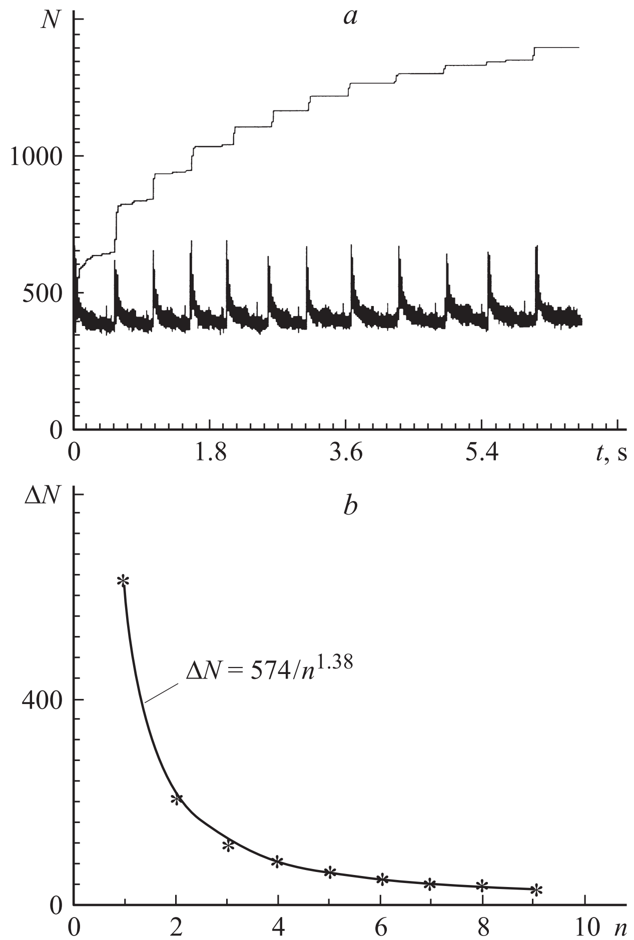

Рис. 4. *a* — функция числа состояний и последовательность импульсов, воздействующих на лопатку 1, *b* — зависимость числа новых состояний системы от номера импульса в серии.

Авторегрессионная модель приращения числа состояний $\Delta N = A/n^{(1+\alpha)} + \varepsilon(n)$, где $\varepsilon(n)$— шумовое слагаемое, позволяет оценить скорость обучения системы [5]. В случае, если приращение числа новых состояний системы по отношению к базовому множеству существенно отличается от предсказанного авторегрессионной моделью, можно сделать вывод об изменении свойств объекта или несоответствии признаков объекта базовому множеству. Так, на рис. 4, а последний импульс воздействовал на лопатку 2 (при прежних параметрах возбуждения и закрепления), в результате чего приращение числа новых состояний значительно превысило предсказанное авторегрессионной моделью для лопатки 1 (рис. 4, *b*).

На рис. 5, *a* приводятся результаты обучения системы распознаванию признаков лопатки 2. Скорость обучения описывается соотношением $\Delta N \approx A/n^{(1+\alpha)}$, $A = 610$, $\alpha = 0.37$ (рис. 5, *b*). После того как завершилось обучение системы, выражающееся в уменьшении числа новых состояний, возникающих под воздействием удара, была проведена замена лопатки 2 на лопатку 1, что привело к резкому росту числа новых состояний ΔN, противоречащему авторегрессионной модели (рис. 5, *a*).

Таким образом, для построения системы распознавания объектов, обладающих геометрическими или структурными различиями может быть применена функция, определенная на дискретном множестве состояний в фазовом пространстве динамической системы. Критерием идентичности или различия объектов в этом случае является приращение числа новых состояний акустического отклика по отношению к базовому множеству. Разрешающая способность функции числа состояний определяется размерностью пространства, в котором анализируется процесс, глубиной анализа „состояния" во времени и размерами ячейки сетки, покрывающей область, занятую фазовой кривой. Данная функция при соответствующей настройке параметров, определяющих „состояние", выявляет моменты времени нарастания и число новых по отношению к базовому множеству состояний, что позволяет выявлять качественные различия в свойствах объектов, реагирующих на внешнее воздействие.

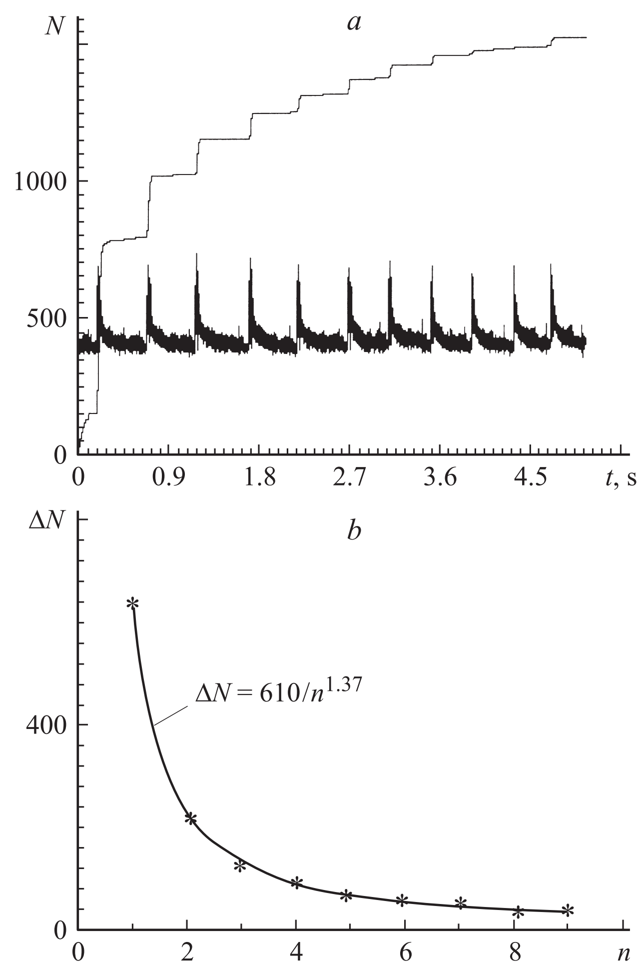

Рис. 5. *a* — функция числа состояний и последовательность импульсов, воздействующих на лопатку 2, *b* — зависимость числа новых состояний системы от номера импульса в серии.

Список литературы

[1] *Тукмаков А.Л.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 6. С. 18–22.
[2] *Тукмаков А.Л.* // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 7. С. 137–140.
[3] *Шустер Г.* Детерминированный хаос. М.: Мир, 1998.
[4] *Шредер М.* // Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. Ижевск: НИЦ „Регулярная и хаотическая динамика“, 2001.
[5] Анализ авторегрессий. Сб. ст. / Под ред. Ю.П. Лукашина. М.: Статистика, 1978. 231 с.